Vol.11, No.3, Fall 2022, pp.23-42 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2022.74921.1159 Open access

The Evaluation of Flood Zone and Hydrograph using ERA5 Precipitation Data (Case Study: Zoshk Basin)

Saeid Pourentezari[a], Kazem Esmaili[b*], Alireza FaridHosseini[b], Elaheh Ghafari[c]

[a] *MSc in Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[b] *Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[c] *PhD in Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*

Received: 25 December 2021 ***Revised: 13 February 2022*** ***Accepted: 18 February 2022***

Abstract

Precipitation is one of the main causes of floods which due to the improper dispersion of rain gauge stations and the newly established ones in most basins of the country, the use of the precipitation data faces serious challenges. Remote-sensing method can be used in such cases. In this study, the reanalysis rainfall data of ERA5 for Kashafrood catchment were evaluated in daily and monthly timescales and then its streamflow hydrograph was evaluated using rainfall data of Zoshk station and Zoshk watershed parameters in the HEC-HMS software. The reanalysis rainfall data of ERA5 showed underestimation and overestimation and also had better accuracy in monthly timescale (R = [0.87-0.99]) than daily timescale (R = [0.89-0.62]) and its flow hydrograph compared to the observational hydrograph was more satisfactory (NSE = 0.49 and PBias = -26.46). Flood zone of reanalysis precipitation data of ERA5 in relation to the reference flood zone was -0.07, which was due to the underestimation of precipitation data and the subsequent underestimation of its hydrograph peak flow in the HEC-HMS model. Future studies can be used to evaluate the flood zone resulting from precipitation data of various products in HEC-RAS model.

Keywords: ERA5, Flood Zone, HEC-HMS, HEC-RAS, Zoshk River

*. Corresponding author: Kazem Esmaili E-mail: esmaili@um.ac.ir Tel: +985138805813

How to cite this Article: Pourentezari, S., Esmaili, K., Faridhosseini, A., & Ghafari, E. (2022). The evaluation of flood zone and hydrograph using ERA5 precipitation data (Case study: Zoshk basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(3), 23-42.
DOI: 10.22067/geoeh.2022.74921.1159

Geography and Environmental Hazards
Volume 11, Issue 3 - Number 43, Fall 2022
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74921.1159

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارۀ چهل و سوم، پاییز ۱۴۰۱، صص ۴۲-۲۳

مقاله پژوهشی

صحت‌سنجی پهنه و هیدروگراف سیلاب با استفاده از داده‌های بارش ERA5 (مطالعه موردی: حوضه زشک)

سعیده پورانتظاری – دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
کاظم اسماعیلی[1]– دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
علیرضا فریدحسینی– دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
الهه غفاری – دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/٤ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۰/۱۱/۲٤ **تاریخ تصویب:** ۱۴۰۰/۱۱/۲۹

چکیده

بارش یکی از اصلی‌ترین عوامل وقوع سیلاب‌هاست که به علت عدم پراکندگی مناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی و تازه‌تأسیس‌بودن برخی از این ایستگاه‌ها در اکثر حوضه‌های کشور، استفاده از داده‌های بارش با چالشی جدی روبروست. ازاین‌رو روش‌های دورسنجی می‌توانند یکی از گزینه‌های مورداستفاده در این زمینه باشند. در پژوهش حاضر، داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5 برای حوضه آبریز کشف‌رود در گام‌های زمانی روزانه و ماهانه مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس هیدروگراف و پهنه سیلاب آن، با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه زشک و پارامترهای مربوط به حوضه آبخیز زشک در نرم‌افزارهای HEC-HMS و HEC-RAS، موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌های بارش ERA5 دارای کم‌برآوردی می‌باشد و داده‌های بارش در گام زمانی ماهانه (R=[۰,٦٨-۰,۹۲]) دقت بالاتری نسبت به روزانه (R=[۰,٥۲-۰,۰۸۱]) داشت و هیدروگراف جریان آن در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی غیرقابل‌قبول (NSE=-۰,٤٧ و PBias=-٥٥,١٦) بود. پهنه سیلاب دبی داده‌های بارش بازتحلیل‌شده

۱ نویسنده مسئول: ۰٥۱۳۸۸۰٥۸۱۳ Email:esmaili@um.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

پورانتظاری, سعیده, اسماعیلی, کاظم, فرید حسینی, علیرضا, غفاری, الهه. (۱٤۰۱). صحت‌سنجی پهنه و هیدروگراف سیلاب با استفاده از داده‌های بارش ERA5 (مطالعه موردی حوضه زشک). جغرافیا و مخاطرات محیطی, ۱۱(۳). صص ٤۲-۲۳
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74921.1159

ERA5 نیز نسبت به پهنه سیلاب دبی مرجع معادل ۰,۱۹- به دست آمد که به دلیل کم‌برآوردی داده‌های بارش و به دنبال آن کم‌برآورد شدن دبی اوج هیدروگراف آن در مدل HEC-HMS این نتیجه به دست آمده است. مطالعات آینده می‌توانند در خصوص ارزیابی پهنه سیلاب حاصل از داده‌های بارش محصولات مختلف در نرم‌افزار HEC-RAS باشند.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی سیلاب، رودخانه زشک، ERA5، HEC-HMS، HEC-RAS

۱- مقدمه

سیلاب آسیب‌ها و خسارات فراوانی به جان و اموال مردم وارد می‌کند. در وقایع سیل ۱۳۹۸ بنابر گزارش سازمان مدیریت بحران کشور، بیش از ٦۰ هزار واحد شهری و روستایی تخریب شدند و بیش از ۷۵ هزار واحد مسکونی شهری و روستایی آسیب دیدند. در این حوادث، ۳۲۸۵ نفر مصدوم و بیمار به مراکز و واحدهای درمانی مراجعه کردند و ۷٦ نفر از هم‌وطنانمان جان خود را از دست دادند (هیئت ویژه گزارش ملی سیلاب‌های ایران, ۱۳۹۸). بارش یکی از اصلی‌ترین عوامل وقوع سیلاب‌های ناگهانی در حوضه‌های آبخیز کوچک است (لو[1] و همکاران، ۲۰۲۲) که به علت عدم پراکندگی مناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی و تازه تأسیس بودن برخی از این ایستگاه‌ها در اکثر حوضه‌های کشور، استفاده از این داده‌ها با چالشی جدی روبروست. ازاین‌رو استفاده از روش‌های دورسنجی می‌تواند یکی از گزینه‌های مورداستفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی (برای دستیابی به مشخصات جریان از قبیل میزان حجم، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج جریان) و هیدرولیکی (برای دستیابی به مشخصات سیلاب از قبیل عمق و تراز سطح آب و سرعت جریان و درنهایت پهنه درگیر سیلاب) باشد. داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5 پنجمین نسل از داده‌های پایگاه مرکز پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا (ECMWF[2]) هستند که از ۱ ژانویه ۱۹۷۹، کل کره زمین را پوشش می‌دهند و دارای توان تفکیک مکانی و زمانی به ترتیب° ۰,۲۵ × °۰,۲۵ و ۱ ساعت می‌باشند (سباه[3] و همکاران، ۲۰۲۱). داده‌های بازتحلیل‌شده از ترکیب نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا با انواع داده‌های محاسباتی و مشاهداتی از سنجنده‌های مختلف به‌دست می‌آیند (کریمی و همکاران، ۱٤۰۰). HEC-HMS یکی از نرم‌افزارهای پرکاربرد در زمینه هیدرولوژی است که فرآیندهای بارش-رواناب حوضه‌های آبریز را شبیه‌سازی می‌کند و برای حل گسترده‌ترین مسائل از قبیل هیدرولوژی سیل، تأمین آب حوضه رودخانه‌های بزرگ و رواناب حوضه‌های طبیعی یا کوچک شهری طراحی شده است (USACE, ۲۰۲۱). مدل هیدرولیکی HEC-RAS نیز نسخه ارتقاءیافته HEC-2 می‌باشد که امکان اجرای جریان ماندگار یک‌بعدی، جریان غیرماندگار یک و دو بعدی، محاسبات انتقال رسوب/مرز متحرک و مدل‌سازی دما و کیفیت آب را به کاربر

1 Lu
2 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
3 Sabah

می‌دهد (جبلی‌فرد و احمدی, ۱۳۹۵). محققان بسیاری در زمینه استفاده از محصولات مبتنی بر روش‌های دورسنجی در مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مطالعاتی انجام داده‌اند. داسگوپتا[1] و همکاران (۲۰۲۰) در حوضه رودخانه ماهانادی[2] در شمال شرق هند، پهنه سیلاب شبیه‌سازی‌شده توسط مدل MIKE21 را با پهنه سیلاب استخراج شده از تصاویر SAR مقایسه کردند. نتایج، توافق بین پهنه سیلاب مدل‌سازی‌شده و مشاهده‌شده، با ضریب R=0.938 را نشان دادند. هاریگان[3] و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی داده‌های دبی روزانه بازتحلیل‌شده GloFAS-ERA5 در سطح جهان پرداختند. نتایج با مقدار KGE=86% و میانه ضریب همبستگی پیرسون ۰,۶۱ مناسب ارزیابی شد. یانگ[4] و همکاران (۲۰۲۱) داده‌های بازتحلیل‌شده دبی سیلاب جهانی (GRFR[5]) را با استفاده از داده‌های بارش ERA5 و مدل‌های VIC و RAPID در گام‌های زمانی سه‌ساعته و روزانه توسعه دادند. نتایج، عملکرد مناسب مدل‌سازی را در همه محدوده‌های جریان در گام زمانی روزانه و سه‌ساعته در سطح جهان نشان داد. بلابید[6] و همکاران (۲۰۱۹) در منطقه‌ای از اتاوا در کانادا به ارزیابی داده‌های بارش IMERGE و TMPA پرداختند و داده‌های بارش IMERGE را به علت دقت بالاتر به‌عنوان ورودی، به مدل‌های MILc و HEC-RAS وارد کرده و درنهایت پهنه سیلاب حاصل را با پهنه سیلاب استخراج‌شده از تصاویر SAR مقایسه نمودند. نتایج، دقت پهنه سیلاب حاصل از داده‌های بارش IMERGE را مطلوب نشان دادند. ترینه و ملکتنین[7] (۲۰۲۱) در حوضه رودخانه ترابانگ[8] در ویتنام ارزیابی داده‌های بارش GSMaP-GNRT6 و CMORPH_CRT پرداختند. به علت دقت بالاتر داده‌های بارش CMORPH، با ادغام مدل‌های MIKE-NAM، MIKE11، MIKE21 و MIKE FLOOD پهنه سیلاب آن تهیه شد و با پهنه سیلاب استخراج‌شده از تصاویر Sentinel-1A مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از دقت مناسب پهنه سیلاب مدل‌سازی‌شده نسبت به مشاهداتی بود. در بررسی‌های صورت‌گرفته در پژوهش‌های پیشین، مطالعات متعددی در زمینه اعتبارسنجی داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5 در سراسر جهان (هوانگ[9] و همکاران، ۲۰۱۹)، (یوان[10] و همکاران، ۲۰۲۱) و (وروپای[11] و همکاران، ۲۰۲۱) و نیز در مناطق مختلف کشور در محدوده‌های استانی (عرفانی‌رحمت‌نیا و همکاران، ۱۳۹۷)، حوضه‌ای (گرجی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸) و (عزیزی‌مبصر و همکاران، ۱۳۹۹)) و کل کشور (مانند ایزدی و همکاران، ۲۰۲۱) صورت گرفته است؛ اما در زمینه استفاده از این داده‌ها در

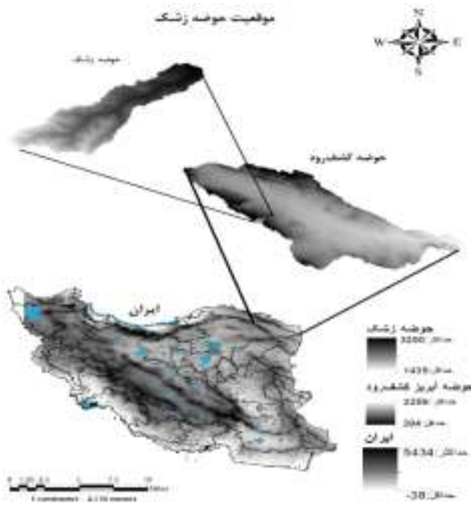
1 Dasgupta
2 Mahanadi
3 Harrigan
4 Yang
5 Global Reach-Level Flood Reanalysis
6 Belabid
7 Trinh و Molkenthin
8 Tra Bong
9 Hwang
10 Yuan
11 Voropay

مدل‌های هیدرولوژیکی به‌ویژه در نرم‌افزار HEC-HMS و بررسی پهنه سیلاب آن در مدل HEC-RAS، تحقیقات کمی انجام شده است. بنابراین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از: ۱) ارزیابی دقت داده‌های بارش یادشده در حوضه آبریز کشف‌رود با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی؛ ۲) بررسی دقت داده‌های بارش ERA5 در نرم‌افزار HEC-HMS جهت برآورد هیدروگراف جریان در زیرحوضه زشک–ابرده؛ ۳) بررسی دقت پهنه سیلاب برآورد شده در رودخانه زشک با استفاده از دبی پیک هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ERA5؛ در راستای اهداف مورد نظر تاکنون مطالعه‌ای در حوضه آبریز کشف‌رود و زیرحوضه زشک–ابرده و رودخانه زشک صورت نگرفته‌است. همچنین جهت شبیه‌سازی مشخصات حوضه در نرم‌افزار HEC-HMS از ابزارهای موجود در منوی GIS استفاده شد که آوریل ۲۰۲۱ به این نرم‌افزار افزوده شده است. در واقع این منو به جای افزونه HEC-GeoHMS استفاده می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

زیرحوضه زشک- ابرده (یا حوضه زشک) در موقعیت جغرافیایی "۳۹ '٤ °۵۹ تا "۱۳ '۱٦ °۵۹ طول شرقی و "۱٦ '۱۵ °۳٦ تا "۱۲ '۲۳ °۳٦ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه دارای مساحت حدود ۹۲۲۷,۷ هکتار، محیط ۵۷,۹ کیلومتر، ارتفاع متوسط در حدود ۲۲۳٤,٦ متر، ارتفاع حداقل ۱٤۲۹ و حداکثر ۳۲٦۱ متر و شیب متوسط حدود ۳۷,۷ درصد در حوضه آبریز کشف‌رود و از نظر سیاسی در محدوده شهرستان طرقبه- شاندیز واقع شده است. طول حوضه ۲۱,۵ کیلومتر بوده و تمامی رواناب این حوضه از طریق رودخانه زشک–ابرده عبور نموده و وارد دشت مشهد می‌شود. بارش متوسط حوضه حدود ٤۰٤ میلیمتر و بیشترین بارندگی ماهانه به‌ترتیب با ۷۱ و ٦۵ میلیمتر در ماه‌های فروردین و اردیبهشت اتفاق می‌افتد که هرکدام حدود ۱۸ و ۱٦ درصد از کل بارش را به خود اختصاص می‌دهند و ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور نیز خشک‌ترین ماه‌های سال می‌باشند. در پژوهش حاضر لایه‌های مورد نیاز از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی و داده‌های دبی و بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز کشف‌رود از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی دریافت شد که به علت نقص در داده‌های ایستگاه‌های حصار–دهبار، خرکت، دولت‌آباد خرم‌دره، شریف‌آباد کشف‌رود، شغل‌آباد و مزدوران، این ایستگاه‌ها از مراحل انجام پژوهش حذف گردیدند. همچنین داده‌های بازتحلیل‌شده ERA5 نیز از پایگاه https://cds.climate.copernicus.eu/ دریافت گردید. جداول ۱ و ۲ به‌ترتیب خصوصیات فیزیوگرافی حوضه زشک و مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز کشف‌رود را نشان می‌دهند.



شکل ۱- موقعیت حوضه زشک

جدول ۱- خصوصیات فیزیوگرافی حوضه زشک (مأخذ: مهندسین مشاور آبخیز گستر شرق)

نام حوضه	مساحت(km^2)	محیط(km)	ارتفاع حداقل (متر)	ارتفاع حداکثر (متر)	ارتفاع متوسط (متر)	ارتفاع میانه (متر)	نمای ارتفاعی (متر)	طول حوضه (km)	شیب متوسط (٪)
حوضه آبخیز زشک-ابرده	۹۲,۲۸	۵۷,۸۹	۱٤۲۹	۳۲٦۱	۲۲۳٤,٦۱	۲۲۳۸	۲۱۵۰	۲۱,۵۳	۵۲,٤٦

جدول ۲- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز کشف‌رود (مأخذ: شرکت آب‌منطقه‌ای خراسان رضوی)

نام ایستگاه	طول	عرض	ارتفاع(m)
آبقد ارداک	۵۹,٤٦	۳٦,۷٦	۱۵۰۵
آبقد فریزی	۵۸,۹٦	۳٦,٤۹	۱۳۹۰
اداره مشهد	۵۹,۵۷	۳٦,۳۱	۱۰۱۸
ارداک بند ساروج	۵۹,۳۹	۳٦,۷۲	۱۳۲۰
آق دربند	٦۰,۸۵	۳۵,۹۹	٦۰۲
آل	۵۹,٦٦	۳٦,۷۱	۱٤٦٤
امامزاده رادکان	۵۹	۳٦,۸	۱۲۱٤
امامزاده میامی	٦۰,۱۲٦	۳٦,۲۳	۱۰۳۹
اندرخ	۵۹,٦٦	۳٦,۵۸	۱۲۰۷
اولنگ اسدی	۵۹,۸	۳٦,۲۵	۹۱۲

نام ایستگاه	طول	عرض	ارتفاع(m)
بلغور	۵۸,۵۹	۳٦,۸٤	۱۹٤۱
بهمن جان علیا	۵۸,۹۷	۳٦,۹	۱۳۷۱
پل خاتون	٦۱,۰۷	۳۵,۹٦	٤۱۰
تلغور	۵۹,۳٦	۳٦,۸۲	۱۵٦۳
جاغرق	۵۹,۳۲	۳٦,۳۱	۱٤۳٤
چکنه علیا	۵۸,٤۷	۳٦,۸٤	۱۷۰٤
چناران	۵۹,۱۳	۳٦,٦٤	۱۱۸٦
دهانه اخلمد	۵۸,۹٤	۳٦,۵۹	۱٤٦۷
زشک خراسان	۵۹,۱۹	۳٦,۳۳	۱۸۳۲
سد طرق	۵۹,۵۵	۳٦,۱۷	۱۲٤۲
سدکارده	۵۹,٦۹	۳٦,٦۲	۱۲۷۹
فریزی	۵۸,۹۷	۳٦,٤۸	۱٦۳۱
قدیرآباد	۵۸,۹۷	۳٦,۸	۱۱۹۵
گلمکان	۵۹,۱۵٦	۳٦,٤۸	۱٤٤۰
گوش بالا	۵۹,۵٦	۳٦,۷۱	۱۵٦۹
مارشک	۵۹,۵٤	۳٦,۸	۱۸۳۰
هندل آباد	۵۹,۹۹	۳٦,٤۲	۱۲۰٦

۲-۲- روش پژوهش

دقت اندازه‌گیری بارش برای مدل‌سازی رواناب و پیش‌بینی سیلاب‌های شدید و همچنین سایر مخاطرات و بلایای طبیعی از اهمیت بالایی برخوردار است (ترینه و ملکنتین[1]، ۲۰۲۱). در پژوهش حاضر جهت دستیابی به اهداف مورد انتظار، داده‌های بارش ERA5 پس از دانلود در گام زمانی روزانه و دقت تفکیک ۰,۱°×۰,۱° برای سال‌های آبی ۱۳۹۵-۹٦ تا ۱۳۹۸-۹۹ در فرمت NetCDF از سایت یادشده در بخش قبل، با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و شاخص‌های آماری به شرح زیر، با بهره‌گیری از برنامه‌نویسی در محیط ویژوال بیسیک در اکسل محاسبه شد.

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2}} \quad (۱)$$

$$NSE^{۲}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})} \quad (۲)$$

---

1 Trinh و Molkenthin
2 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

$$\text{RMSE}^{1}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2} \quad (۳)$$

$$\text{PBias}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)}{\sum_{i=1}^{n}O_i}\times 100 \quad (٤)$$

$$\text{FAR}^{2}=\frac{\text{F}}{\text{H+F}} \quad (٥)$$

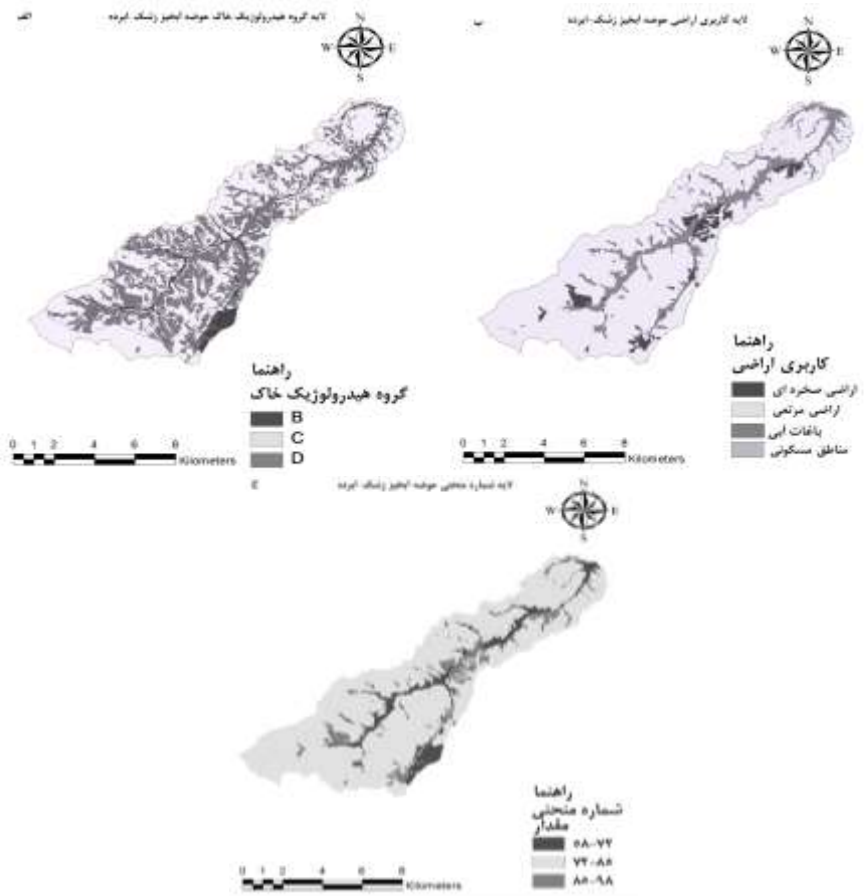
$$\text{POD}^{3}=\frac{\text{H}}{\text{H}+\text{M}} \quad (٦)$$

$$\text{TS}^{4}=\frac{\text{H}}{\text{H}+\text{F}+\text{M}} \quad (٧)$$

که O_i داده‌های مشاهداتی، P_i داده‌های شبیه‌سازی‌شده، $\bar{O}$ متوسط داده‌های مشاهداتی، H تعداد رویدادهای پیش‌بینی‌شده موفقیت‌آمیز توسط یک محصول بارشی معین، F تعداد موارد غیرواقعی که به اشتباه پیش‌بینی شده‌اند و M تعداد رویدادهای واقعی که از دست رفته‌اند. شاخص FAR نسبت هشدار اشتباه که نسبت تعداد رویدادهای پیش‌بینی‌شده نادرست به تعداد کل رویدادهای پیش‌بینی‌شده است؛ POD احتمال تشخیص که نسبت تعداد رویدادهای پیش‌بینی‌شده درست به کل بارندگی‌های ثبت‌شده توسط ایستگاه‌ها است. TS امتیاز تهدید که اندازه‌گیری یکپارچه‌ای از عملکرد کلی را ارائه می‌دهد. محدوده تغییرات این سه شاخص (۱-۰) است؛ مقدار ایده آل برای FAR نزدیک به صفر و برای TS و POD نزدیک به یک می‌باشد. پس از ارزیابی داده‌های بارش ERA5، در مرحله بعد لایه مدل رقوم ارتفاعی (DEM) با توان تفکیک مکانی ۱۲٫۵متر ماهواره ALOS–PALSAR برای حوضه زشک از وبسایت vertex.daac.asf.alaska.edu دریافت گردید و سپس در نرم‌افزار HEC-HMS فراخوانی شد و با استفاده از فرامین موجود در منوی GIS پارامترهای حوضه محاسبه شدند. در ادامه جهت محاسبه میزان تلفات نفوذ از روش شماره منحنی SCS استفاده شد. در راستای استفاده ازاین‌روش، محاسبات مربوط به درصد نفوذناپذیری و متوسط شماره منحنی هر یک از زیرحوضه‌ها به‌ترتیب از طریق لایه‌های کاربری اراضی و شماره منحنی به دست آمدند. شکل‌های ۲-الف تا ج به‌ترتیب لایه‌های گروه هیدرولوژیک خاک و کاربری اراضی و شماره منحنی را نشان می‌دهند. به‌منظور تبدیل بارش به رواناب نیز از روش هیدروگراف واحد SCS استفاده شد. پس از معرفی مدل حوضه، مدل هواشناسی، مشخصه کنترل و ورود داده‌های بارش و دبی به نرم‌افزار، اقدام به واسنجی مدل شد. بدین منظور پس از بررسی وقایع متعدد بارش و رواناب درنهایت دو واقعه مربوط به ۹۱/۱/۱۱ و ۹۱/۲/٦ جهت واسنجی و یک واقعه مربوط به ۹۹/۱/۲۳ جهت اعتبارسنجی مدل انتخاب شدند. برای ارزیابی مدل نیز شاخص‌های آماری

1 Root-Mean-Square Error
2 False Alarm Ratio
3 Probability Of Detection
4 Threat Score

ضریب کارایی نش ساتکلیف (NSE) و درصد Bias استفاده گردیدند. مبنای سنجش شاخص‌های مورداستفاده در این پژوهش، عملکرد شاخص‌های آماری برای مدل‌های حوضه آبریز ارائه شده توسط موریاسی[1] و همکاران (۲۰۱۵) می‌باشد.



شکل ۲-الف-نقشه گروه هیدرولوژیک خاک حوضه زشک؛ ب- نقشه کاربری اراضی حوضه زشک؛ ج- نقشه شماره منحنی حوضه زشک (دریافتی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی)

درنهایت لایه DEM یک متر رودخانه زشک به طول حدود ۳٫۳ کیلومتر بالادست ایستگاه زشک از شرکت تکاب سبز توس دریافت شد و به همراه دبی پیک سیلاب بدست‌آمده از هیدروگراف سیلاب در مرحله قبل، وارد مدل HEC-RAS شده و با استفاده از منوی RAS Mapper خط‌القعر رودخانه، سواحل چپ و راست، خطوط مسیر جریان و مقاطع عرضی رسم شدند. در واقع منوی RAS Mapper به جای افزونه HEC-GeoRAS

1 Moriasi

استفاده می‌شود. روند محاسبه پروفیل سطح آب در حالت جریان ماندگار در مدل هیدرولیکی HEC-RAS از یک مقطع به مقطع بعدی و با حل معادله انرژی به روش گام به گام استاندارد می‌باشد. در این روش، محاسبات، بسته به نوع جریان از یکی از دو بازه انتهایی (در جریان فوق بحرانی از مقطع بالادست و در جریان زیربحرانی از مقطع پایین‌دست) شروع می‌شود. اساس این روش بر مبنای رابطه انرژی (رابطه۸) است.

$$y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_l \quad (۸)$$

در این رابطه y_1 و y_2 عمق آب در مقطع ابتدایی و انتهایی رودخانه (m)، z_1 و z_2 رقوم کف رودخانه در دو مقطع یادشده (m)، v_1 و v_2 سرعت در دو مقطع یادشده (m/s)، α_1 و α_2 ضرایب تصحیح انرژی جنبشی در دو مقطع یادشده، g شتاب ثقل (m/s^2) و h_l افت انرژی (m) است. افت انرژی کل نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_l = LS_f + c\left|\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}\right| \quad (۹)$$

در این رابطه L فاصله (m) و S_f شیب اصطکاکی بین دو مقطع و c ضریب افت تنگ‌شدگی و بازشدگی می‌باشد. L فاصله بین دو مقطع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L = \frac{L_{lob}Q_{lob} + L_{ch}Q_{ch} + L_{rob}Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (۱۰)$$

که در آن L_{lob} و L_{rob}، L_{ch} فواصل بین سواحل راست، کانال اصلی و چپ بین هر دو مقطع؛ Q_{lob} و Q_{rob}، Q_{ch} دبی جریان بین سواحل راست، کانال اصلی و چپ بین هر دو مقطع می‌باشد. درنهایت پس از تعیین شرایط مرزی، اجرا و واسنجی مدل، پهنه سیلاب حاصل از دبی پیک بدست‌آمده از هیدروگراف سیلاب با استفاده از داده‌های بارش ERA5 (دبی ERA5) نسبت به دبی ایستگاه هیدرومتری زشک (دبی مرجع) ارزیابی شد.

۳- نتایج و بحث

پژوهش حاضر جهت بررسی پهنه سیلاب حاصل از دبی ERA5 نسبت به دبی مشاهداتی انجام شد. بدین منظور ابتدا داده‌های بارش ERA5 در حوضه آبریز کشف‌رود مورد ارزیابی قرار گرفت و پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS با وقایع یادشده در بخش قبل، داده‌های بارش ERA5 در موقعیت ایستگاه

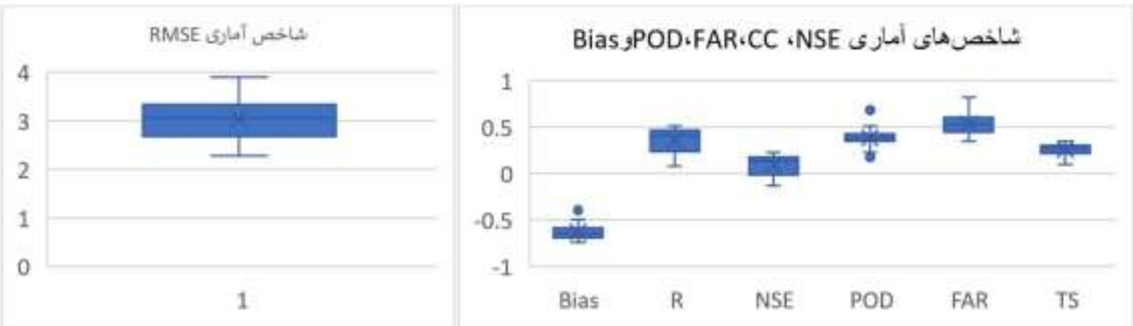
زشک مربوط به تاریخ ۹۹/۱/۲۳ وارد HEC-HMS شد و نتایج مربوط به هیدروگراف خروجی آن با نتایج مربوط به ایستگاه زشک موردبررسی قرار گرفت. درنهایت پهنه سیلاب حاصل از دبی ERA5 نسبت به دبی مرجع با استفاده از HEC-RAS و Arc GIS مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه نتایج مربوط به هر بخش به صورت جداگانه آمده است.

۳-۱- ارزیابی دقت داده‌های بازتحلیل‌شده ERA5 در گام زمانی روزانه

در راستای ارزیابی دقت داده‌های بارش ERA5 نسبت به داده‌های بارش زمینی، شاخص‌های آماری مورداستفاده در این پژوهش در جدول ۳ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر NSE در محدوده مجاز (۱-∞-) به دست آمده است. همچنین مقادیر RMSE و R در محدوده رضایت‌بخشی به دست آمدند. به طور کلی این محصول در تخمین بارش‌های شدید دارای کم‌برآوردی بود که این نتیجه در مطالعه سینق[1] و همکاران (۲۰۲۱) نیز مشاهده شده‌بود. شکل ۳ نیز نمودارهای جعبه‌ای شاخص‌های محاسبه‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهند.

جدول ۳- جدول مقادیر شاخص‌های آماری جهت ارزیابی داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی روزانه

	حداقل	حداکثر	میانگین	میانه
Bias	-۰,۳۹۳	-۰,۷٤۱	-۰,٦۲۷	-۰,٦٤٦
RMSE	۲,۲۸٦	۳,۸۹۹	۳,۰۳۷	۳,۰٦۳
POD	۰,۱۷۷	۰,٦۸٦	۰,۳۸٦	۰,۳۸٤
FAR	۰,۳٥۰	۰,۸۲۱	۰,٥۳۹	۰,٥۳٥
TS	۰,۰۹۸	۰,۳٥۲	۰,۲٦۳	۰,۲۸۱
R	۰,۰۸۱	۰,٥۱۷	۰,۳٦۳	۰,٤۱۱
NSE	-۰,۱۳۲	۰,۲۳۲	۰,۰۹۷	۰,۱٤۲



1 Singh

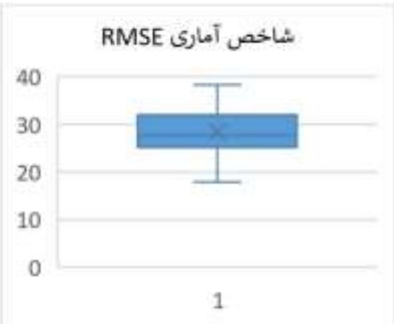
شکل ۳- نمودار جعبه‌ای شاخص‌های CC، NSE، POD، FAR، TS و Bias (سمت راست) ونمودار جعبه‌ای RMSE (سمت چپ)

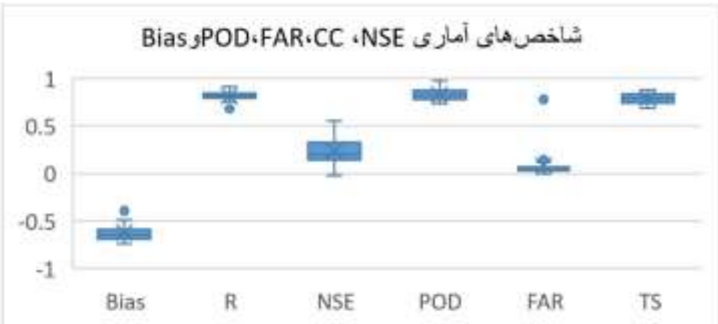
۳-۲- ارزیابی دقت داده‌های بازتحلیل‌شده ERA5 در گام زمانی ماهانه

در ارزیابی دقت داده‌های بارش ERA5 نسبت به داده‌های بارش زمینی درگام زمانی ماهانه، شاخص‌های آماری مورداستفاده در این پژوهش در جدول ٤ آمده است. شکل ٤ نیز نمودارهای جعبه‌ای شاخص‌های محاسبه‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. نتایج بدست‌آمده نشان‌دهنده عملکرد نامناسب داده‌های ERA5 در ماه‌های گرم و خشک (فصل تابستان) بود و در بقیه سال عملکرد مناسب‌تری داشت. به طور کلی مقادیر شاخص‌های ارزیابی به مقدار ایده‌آل خود نسبت به گام زمانی روزانه، نزدیک‌تر شده‌اند.

جدول ٤- جدول مقادیر شاخص‌های آماری جهت ارزیابی داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی ماهانه

	حداقل	حداکثر	میانگین	میانه
Bias	-۰,۳۹	-۰,۷٤	-۰,٦۳	-۰,٦٥
RMSE	۱۷,۸٥	۳۸,۲۷	۲۸,۳۷	۲۷,٦۷
POD	۰,۷٤	۰,۹۷	۰,۸۳	۰,۸۲
FAR	۰,۰۰	۰,۱٦	۰,۰٦	۰,۰٦
TS	۰,٦۸	۰,۸۸	۰,۷۹	۰,۷۸
R	۰,٦۸	۰,۹۲	۰,۸۲	۰,۸۲
NSE	-۰,۰۲	۰,٥٥	۰,۲۳	۰,۲۰





شکل ٤- نمودار جعبه‌ای شاخص‌های CC، NSE، POD، FAR، TS و Bias (سمت راست) ونمودار جعبه‌ای RMSE (سمت چپ)

۳-۳- ارزیابی هیدروگراف سیلاب

پس از اعتبارسنجی داده‌های بارش ERA5، نرم‌افزار HEC-HMS با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه زشک در وقایع ۹۱/۱/۱۱ و ۹۱/۲/٦ مورد واسنجی و با استفاده از واقعه مربوط به ۹۹/۱/۲۳ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. سپس داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی روزانه در موقعیت ایستگاه زشک مربوط به واقعه ۹۹/۱/۲۳ وارد HEC-HMS شد و نتایج آن با استفاده از شاخص‌های آماری NSE و PBias مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه همانطور که قبلاً بیان شد جهت محاسبه پارامترهای حوضه در نرم‌افزار HEC-HMS، از منوی GIS شد. شکل ۵ شمایی از مدل حوضه ساخته‌شده در نرم‌افزار HEC-HMS با استفاده از منوی GIS را نشان می‌دهد. جدول ۳ نیز برخی از پارامترهای محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار HEC-HMS را نشان می‌دهد.



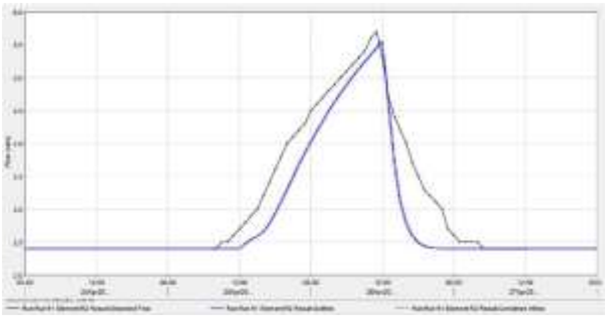
شکل ۵- شمایی از مدل حوضه ساخته شده در HEC-HMS از حوضه زشک

جدول۳- جدول برخی از پارامترهای محاسبه شده توسط نرم‌افزار HEC-HMS

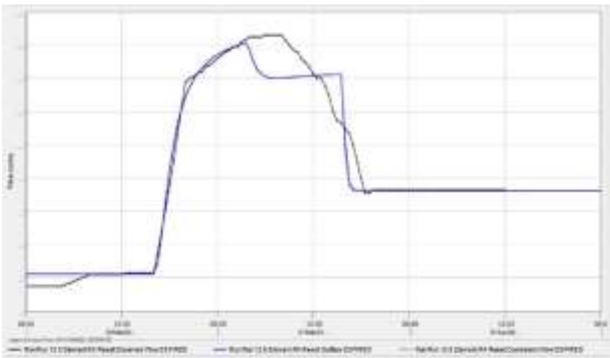
نام زیرحوضه	مساحت (km^2)	طولانی‌ترین مسیر جریان (km)	طولانی‌ترین شیب	طولانی‌ترین مسیر جریان از مرکز ثقل تا خروجی زیرحوضه‌ها (km)	۱۰-۸۵٪ طولانی‌ترین مسیر جریان	شیب زیرحوضه	ضریب کشیدگی	تراکم زهکشی
Z1	۱٤,۵	۷,۱٦	۰,۱٦	۳,۵۱	۵,۳۷	۰,٤٦	۰,۵۹	۰,۵۸
Z2	٦,۹٦	٤,۲۵	۰,۲۰	۲,۰٤	۳,۱۸	۰,٤٦	۰,۷۰	۰,۵۷
Z'1	۱۵,۸۳	٦,۱۲	۰,۱۷	۱,۸٦	٤,۵۹	۰,٤۹	۰,۷۳	۰,۷۲
Z3	۱۲,۰۲	۸,٦۸	۰,۱۳	٤,٤٤	٦,۵۱	۰,۵۰	۰,٤۵	۰,٦۲
Z'2	٦,۷۱	٤,۳٦	۰,۱۸	۱,۵۷	۳,۲۷	۰,۵۱	۰,٦۷	۰,۵۰
Z'3	۸,۳۹	٤,۳۰	۰,۱۳	۱,۱۵	۳,۲۳	۰,٤۱	۰,۷٦	۰,۷٤
Z'4	۹,٤۲	٦,۵۱	۰,۰۹	۲,٦۰	٤,۸۸	۰,٤۲	۰,۵۳	۰,٦۵
Z4	۲,۹۹	۳,٤۲	۰,۱۷	۱,۵۳	۲,۵٦	۰,۳۸	۰,۵۷	۰,۷٤

Z'5	۳,۹۷	۵,۴۰	۰,۰۸	۳,۱۹	۴,۰۵	۰,۳۰	۰,۴۲	۰,۹۶
Z'5	۱۰,۱۳	۶,۷۲	۰,۰۹	۲,۹۶	۵,۰۴	۰,۳۵	۰,۵۳	۰,۷۲

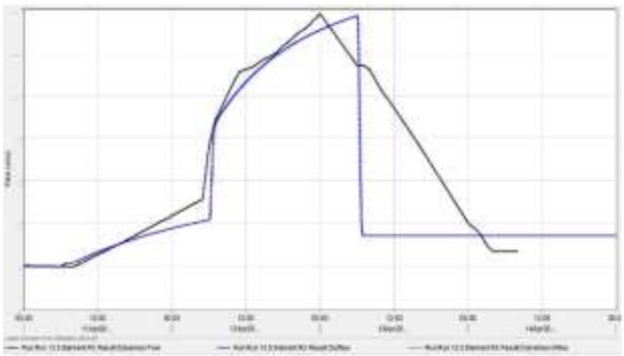
به منظور مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی، شکل‌های ۶ تا ۸ در ادامه ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود مدل در پیش‌بینی بازوی پایین‌رونده هیدروگراف، دقت کمتری داشته‌است که این مسئله به علت ورود داده‌های بارش در گام زمانی روزانه (به علت عدم وجود بارانسنج ثبات در حوضه زشک) بود که به تبع آن، دقت هیدروگراف محاسباتی نسبت به هیدروگراف مشاهداتی که در گام زمانی ساعتی وارد شده، کمتر بوده‌است. همچنین مقادیر دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج نسبت به هیدروگراف مشاهداتی با اختلاف برآورد شده است که این مسئله با نتایج شاخص‌های آماری در جدول ۵ مطابقت دارد.



شکل ۶- هیدروگراف واقعه ۹۱/۲/۶



شکل ۷- هیدروگراف واقعه ۹۱/۱/۱۱



شکل ۸- هیدروگراف واقعه ۹۹/۱/۲۳

جدول ۵-مقادیر حجم و دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی بهمراه اختلاف و درصد اختلاف بین آن‌ها

	۹۱/۲/٦			۹۱/۱/۱۱			۹۹/۱/۲۳		
	حجم (mm)	دبی پیک (M3/S)	زمان رسیدن به دبی اوج	حجم (mm)	دبی پیک (M3/S)	زمان رسیدن به دبی اوج	حجم (mm)	دبی پیک (M3/S)	زمان رسیدن به دبی اوج
هیدروگراف محاسباتی	۱۷,٦۲	٥,٦	۹۱/۲/۷,۱۲:۰۰	٧٦,۰۲	١٦,١	۹۱/۱/۱۲,۷:۰۰	۳۳,۲۲	۱۳,۷	۹۹/۱/۲٥,۰٦:۰۰
هیدروگراف مشاهداتی	۱۲,۱۹	٥,۷	۹۱/۲/۷,۱۱:۰۰	٦٦,۰۲	١٦,٦	۹۱/۱/۱۲,۱۲:۰۰	۳٥,۲۷	۱۳,۸	۹۹/۱/۲٥,۰۰:۰۰
اختلاف	٥,٤۳	-۰,۱	۱	۱۰	-۰,٥	٥	-۲,۰٥	-۰,۱	٦
درصد اختلاف	۰,۳۱	-۰,۰۲	-	۰,۱۳	-۰,۰۳	-	-۰,۰٦	-۰,۰۰۷	-

از بین پارامترهای آماری سنجش خطا نیز در این پژوهش از ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد Bias استفاده شد که نتایج آن در جدول ٦ آمده است. طبق مطالعه موریاسی[1] و همکاران (۲۰۱٥) در مورد رتبه‌بندی عملکرد شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های حوضه آبریز، نتایج مشروحه در جدول ۷ نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل هستند زیرا شاخص‌های NSE در محدوده‌های بسیارخوب و خوب و PBias در محدوده‌های بسیارخوب، خوب و قابل قبول قرار گرفتند. در همین جدول مقادیر منفی درصد Bias نشان می‌دهند که مقادیر جریان شبیه‌سازی‌شده کمتر از مقادیر مشاهداتی بوده است که این مسئله همراستا با مطالعه خضریان نژاد و همکاران (۱۳۹۱) می‌باشد. به‌طورکلی در همه وقایع، عملکرد مدل رضایت‌بخش بوده است.

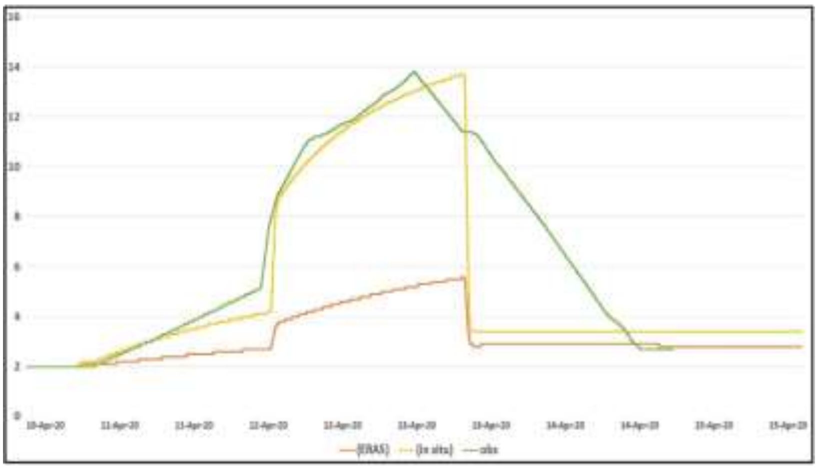
جدول ٦- مقادیر شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد Bias برای وقایع ۹۱/۱/۱۱، ٦ /۹۱/۲ و ۹۹/۱/۲۳

شاخص‌های آماری	۹۱/۱/۱۱	۹۱/۲/٦	۹۹/۱/٦
نش ساتکلیف	۰,۸۰۲	۰,۹٦٦	۰,٦٤٤
درصد Bias	-۹,۷٥	-۱,۸۸	-۱٥,۸۲

۳-٤- ارزیابی هیدروگراف سیلاب با استفاده از داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5

1 Moriasi

در راستای ارزیابی دقت هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5، شکل ۹ هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری (هیدروگراف مشاهداتی)، هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک (داده‌های بارش زمینی) و هیدروگراف سیلاب حاصل از داده‌های بارش ERA5 را نشان می‌دهد. بنابراین شکل، هیدروگراف سیلاب حاصل از داده‌های بارش ERA5 دارای کم‌برآوردی می‌باشد که علت آن کم‌برآورد کردن میزان بارش در موقعیت ایستگاه زشک در محدوده روزهای متناظر با واقعه ۹۹/۱/۲۳ توسط ERA5 بود. عدم تطابق بازوی پایین رونده هیدروگراف‌های داده‌های بارش ایستگاه زشک و ERA5 به دلیل عدم برابری گام‌های زمانی داده‌های دبی و بارش بود که در بخش قبل توضیح داده‌شد. جدول ۷ مقادیر حجم و دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی به همراه اختلاف و درصد اختلاف بین آن‌ها برای هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ERA5 را نشان می‌دهد.



شکل ۹- هیدروگراف سیلاب حاصل از داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری (منحنی سبز)، هیدروگراف سیلاب حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک (منحنی زرد)، هیدروگراف سیلاب حاصل از داده‌های بارش ERA5 (منحنی قرمز)

جدول ۷- مقادیر حجم و دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی به همراه اختلاف و درصد اختلاف بین آن‌ها برای هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ERA5

	۹۹/۱/۲۳هیدروگراف سیلاب مشاهداتی			۹۹/۱/۲۳بارش ERA5		
	حجم(mm)	دبی پیک (M3/S)	زمان رسیدن به دبی اوج	حجم(mm)	دبی پیک (M3/S)	زمان رسیدن به دبی اوج
هیدروگراف محاسباتی	۳۳,۲۲	۱۳,۷	۹۹/۱/۲۵،۰٦:۰۰	۱۷,۸۷	٥,٦	۹۹/۱/۲۵،۰٦:۰۰
هیدروگراف مشاهداتی	۳٥,۲۷	۱۳,۸	۹۹/۱/۲۵،۰۰:۰۰	۳٥,۲۷	۱۳,۸	۹۹/۱/۲۵،۰۰:۰۰

اختلاف	-۲٫۰۵	-۰٫۱	٦	۱۷٫٤	-۷٫۸	٦
درصد اختلاف	-۰٫۰٦	-۰٫۰۰۷	-	-۰٫۹۷	-۱٫٤٦	-

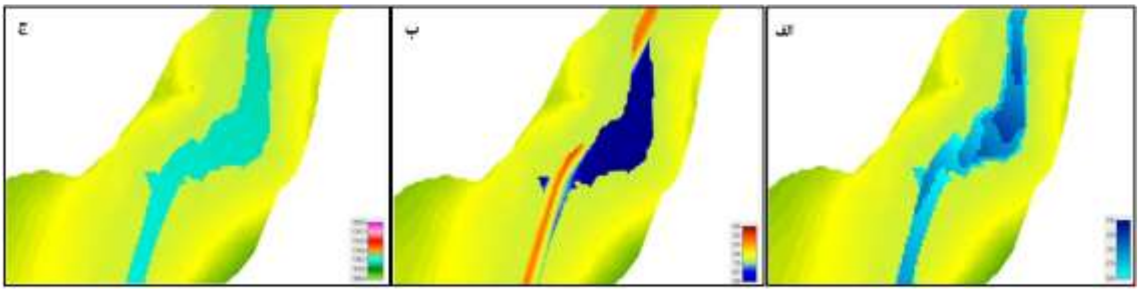
با توجه به مطالعه موریاسی[1] و همکاران (۲۰۱۵) و شاخص‌های NSE و درصد Bias در جدول ۸ داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5 با دارابودن ضریب NSE و PBias در محدوده غیر قابل قبول (NSE≤0.5 و PBias≤±25)، نسبت به هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک، کارایی این منبع بارشی پایین می‌باشد. همچنین با توجه به جدول ۸ به دلیل کم‌برآوردی داده بارش توسط این محصول، در نرم‌افزار HEC-HMS نیز میزان دبی پیک به مقدار کمتری محاسبه شده است.

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد Bias برای هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ERA5

شاخص‌های آماری	۹۹/۱/۲۳هیدروگراف سیلاب مشاهداتی	۹۹/۱/۲۳بارش ERA5
نش ساتکلیف	۰٫٦٤٤	-۰٫٤۷
درصد Bias	-۱۵٫۸۲	-۵۵٫۱٦

۳-۵- پهنه‌بندی سیلاب

درنهایت پهنه سیلاب با استفاده از دبی پیک به دست آمده در مرحله قبل به همراه سایر اطلاعات ورودی به نرم‌افزار HEC-RAS مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، مدل با استفاده از داده‌های دبی–اشل ایستگاه هیدرومتری زشک و تغییر مکرر ضریب زبری مورد واسنجی قرار گرفت. شکل ۱۰ تغییرات مربوط به عمق آب، سرعت جریان و تراز سطح آب پس از واسنجی مدل و اجرای آن با استفاده از دبی مرجع را نشان می‌دهد.



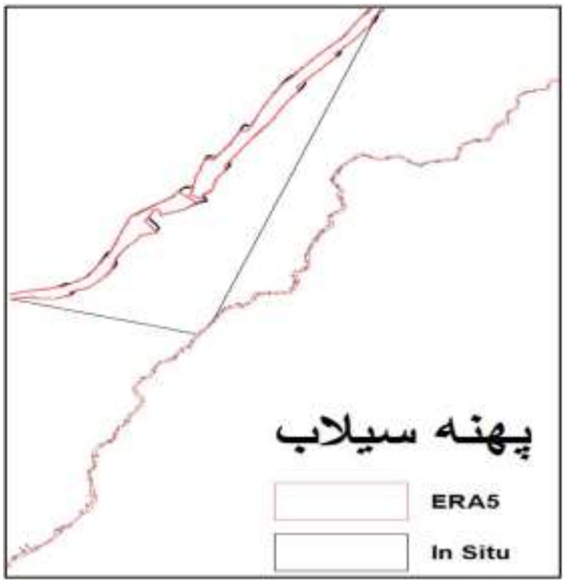
شکل ۱۰-تغییرات مربوط به عمق آب(الف)، سرعت جریان (ب) و تراز سطح آب (ج) در منوی RAS Mapper در نرم‌افزار HEC-RAS

1 Moriasi

در پایان پهنه سیلاب به دست آمده از دبی ERA5 با پهنه سیلاب به دست آمده از دبی مرجع مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱۱ پهنه سیلاب حاصل از دبی ERA5 و دبی مرجع را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود وسعت پهنه سیلاب حاصل از دبی ERA5 به دلیل کم‌برآوردی داده‌های بارش و به دنبال آن کم‌برآورد شدن دبی اوج هیدروگراف آن در مدل HEC-HMS، کمتر از وسعت پهنه سیلاب حاصل از دبی مرجع، به دست آمده است. جدول ۹ نیز مؤید این مسئله می‌باشد.

جدول ۹-اختلاف و درصد اختلاف مساحت پهنه سیلاب دبی شبیه‌سازی‌شده نسبت به پهنه دبی مشاهداتی

منبع بارشی	اختلاف مساحت پهنه سیلاب نسبت به پهنه دبی مشاهداتی	درصد اختلاف مساحت پهنه سیلاب نسبت به پهنه دبی مشاهداتی
ERA5	-۳۹۳۱,۲۳	-۱۸,۹۳



شکل ۱۱-پهنه سیلاب به دست آمده از دبی ERA5 و دبی مرجع

٤- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر به بررسی دقت برآورد پهنه سیلاب حاصل از دبی ERA5 نسبت به پهنه سیلاب حاصل از دبی مرجع پرداخته شد. بدین منظور ابتدا نیاز به اعتبارسنجی داده‌های بارش این محصول در حوضه آبریز کشف‌رود بود. کم‌برآوردی داده‌های بارش ERA5 هم‌راستا با مطالعه ایزدی و همکاران (۲۰۲۱) می‌باشد. همچنین دقت این محصول در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS نسبت به هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک

رضایت‌بخش نبود اما در مطالعه یین[1] و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد این محصول قابل قبول بود. پهنه سیلاب دبی ERA5 نیز نسبت به پهنه سیلاب دبی مرجع ۰,۱۹− به دست آمد که به دلیل کم‌برآوردی داده‌های بارش و به دنبال آن کم‌برآورد شدن دبی اوج هیدروگراف آن در مدل HEC-HMS می‌باشد. مطالعات آینده می‌توانند در خصوص ارزیابی پهنه سیلاب حاصل از داده‌های بارش محصولات مختلف در نرم‌افزار HEC-RAS باشند. همچنین در جهت افزایش دقت این محصولات، با ترکیب آن‌ها با یکدیگر امجد[2] و همکاران (۲۰۲۰) می‌توان به این مهم دست یافت.

کتابنامه

جبلی‌فرد، س؛ احمدی، ح؛ ۱۳۹۵. *راهنمای کاربران سیستم تحلیل رودخانه HEC-RAS*. جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر: https://www.gisoom.com/book/1951120/.

خضریان‌نژاد، ن؛ حجام، س؛ میرزایی، امشکواتی، ا؛ ۱۳۹۱. پیش‌بینی رواناب حوضه آبریز تیره با استفاده از پیش‌بینی کمی بارش خروجی مدل WRF. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*. ۳.
https://clima.irimo.ir/article_13720.html.

عرفانی‌رحمت‌نیا، ع؛ باباییان، انتظاری، ع؛ ۱۳۹۷. کارآیی داده‌های بازکاوی ERA-Interim در شبیه‌سازی بارش مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی خراسان رضوی. دومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی. دانشگاه فردوسی مشهد. https://civilica.com/doc/780994.

عزیزی‌مبصر، ج؛ رسول‌زاده، ع؛ رحمتی، ا؛ شایقی، اباختر، آ؛ ۱۳۹۹. ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل‌شده Era-5 در تخمین بارش روزانه و ماهانه در استان اردبیل. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۱. ۲۹۳۷–۲۹۵۱.
https://www.sid.ir/paper/402729/fa.

کریمی، م؛ حیدری، سرفعتی، س؛ ۱٤۰۰. روند تغییرات مولفه‌های جوی چرخه آب (بارش و آب قابل بارش) در حوضه‌های آبریز ایران. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۸. ۳۳–٥٤.
https://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3176-fa.html.

گرجی‌زاده، ع؛ آخوندعلی، عم؛ شهبازی، ع؛ مریدی، ع؛ ۱۳۹۸. مقایسه و ارزیابی بارش برآورد شده توسط مدل‌های ERA-Interim، PERSIANN-CDR و CHIRPS در بالادست سد مارون. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*. ۱٥، ۲٦۷–۲۷۹. https://www.sid.ir/paper/100048/fa.

Amjad M, Yilmaz M, Yucel IYilmaz K., 2020. Performance Evaluation of Satellite- and Model-based Precipitation Products over Varying Climate and Complex Topography. Journal of Hydrology 584: 124707. https://10.1016/j.jhydrol.2020.124707.

1 Yin
2 Amjad

Belabid N, Zhao F ,Brocca L, Huang YTan Y., 2019. Near-Real-Time Flood Forecasting Based on Satellite Precipitation Products. Remote Sensing 11: 252. https:// doi.org/ 10.3390/ rs11030252.

Dasgupta A, Thakur PGupta P., 2020. Potential of SAR-Derived Flood Maps for Hydrodynamic Model Calibration in Data Scarce Regions. Journal of Hydrologic Engineering https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001988.

Harrigan S, Zsoter E, Alfieri L, Prudhomme C, Salamon P, Wetterhall F, Barnard C, Cloke HPappenberger F., 2020. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present. Earth Syst. Sci. Data 12: 2043-2060. https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020.

Hwang S-O, Park JKim HM., 2019. Effect of hydrometeor species on very-short-range simulations of precipitation using ERA5. Atmospheric Research 218: 245-256. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.12.008.

Izadi N, Ghasemi E, Ranjbar A, Shamsipour A, Fattahi EHabibi M., 2021. Evaluation of ERA5 Precipitation Accuracy Based on Various Time Scales over Iran during 2000–2 .۰۱۸Water 13: 2538. https://10.3390/w13182538.

Lu L, Yuan W, Su C, Gao Q, Yan DWu Z., 2022. Study on the early warning and forecasting of flash floods in small watersheds based on the rainfall pattern of risk probability combination. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 36: 1-16. https://doi.org/ 10.1007/ s00477-021-02059-0.

Moriasi D, Gitau M, Pai NDaggupati P., 2015. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) 58: 1763-1785. https:/ /doi.org/ 10.13031/trans.58.10715.

Sabah P, Junaid Nazir K, Rohitashw KSaqib Parvaze A., 2021. Flood Forecasting in the Sparsely Gauged Jhelum River Basin of Greater Himalayas Using Integrated Hydrological and Hydraulic Modelling Approach. Climate Dynamics https://10.21203/rs.3.rs-461873/v1.

Shayeghi A, Azizian A, Brocca L., 2019. The Reliability of Reanalysis and Remotely Sensed Precipitation Products for Hydrological Simulation over the Sefidrood River Basin in Iran. Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques https:// 10.1080/ 02626667. 2019.1691217.

Singh T, Saha U, Prasad VSGupta MD., 2021. Assessment of newly-developed high resolution reanalyses (IMDAA, NGFS and ERA5) against rainfall observations for Indian region. Atmospheric Research 259: 105679. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105679.

Trinh M. Molkenthin F., 2021. Flood hazard mapping for data-scarce and ungauged coastal river basins using advanced hydrodynamic models, high temporal-spatial resolution remote sensing precipitation data, and satellite imageries. Natural Hazards 109: https:// doi.org/ 10.1007/s11069-021-04843-1.

USACE. 2021. Hydrologic Modeling System HEC-HMS,User’s Manual, Technical Reference Manual. Journal, 676 .

Voropay N, Ryazanova ADyukarev E., 2021. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia. Atmospheric Research 254: 105528. https:// doi.org/ 10.1016/ j.atmosres.2021.105528.

Yang Y, Pan M, Lin P, Beck H ,Zeng Z, Yamazaki D, David C, Lu H, Yang K, Hong YWood E. 2021. Global Reach-Level 3-Hourly River Flood Reanalysis (1980–2019). Bulletin of the American Meteorological Society 102: 1-49. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0057.1.

Yin J, Guo S, gu L, Zeng Z ,Liu D, Chen J, Shen Y, Xu C-Y., 2020. Blending multi-satellite, atmospheric reanalysis and gauge precipitation products to facilitate hydrological modelling. Journal of Hydrology 593: https://10.1016/j.jhydrol.2020.125878.

Yuan X, Yang K, Lu H, He J, Sun JWang Y., 2021. Characterizing the features of precipitation for the Tibetan Plateau among four gridded datasets: Detection accuracy and spatio-temporal variabilities. Atmospheric Research 264: 105875. https:// doi.org/ 10.1016/ j.atmosres. 2021.105875.